

SOBRE LA INCIDENCIA DEL USO Y LA GESTIÓN DE LOS EDIFICIOS EN EL CONSUMO FINAL DE ENERGÍA

Fabián López Plazas

El trabajo que se resume en este artículo parte de la Tesis doctoral del autor¹ leída en la Universidad Politécnica de Cataluña - UPC. Como quiera que las conclusiones de la Tesis y los resultados del trabajo realizado, motivaron en su momento el interés de la propia UPC que creó el programa UPCO₂ para reducir las emisiones de CO₂ y promover la eficiencia energética en sus edificios, en la segunda parte del artículo se presenta un breve resumen de los trabajos realizados con posterioridad a la Tesis y que han permitido contrastar las hipótesis de partida y obtener ahorros significativos en términos económicos y de emisiones de CO₂ evitadas.

1. INTRODUCCIÓN

La parametrización y evaluación del uso y la gestión de los edificios como un factor de gran incidencia en el consumo final de energía de los edificios es el planteamiento de partida de esta investigación, cuyo objetivo es demostrar de qué modo a través de una metodología adecuada es posible cuantificar, analizar y valorar dicha incidencia. El trabajo se realiza a partir del análisis de las características y realizando el seguimiento del consumo energético y la gestión de algunos edificios de uso docente de la UPC, con diferencias y similitudes respecto a los factores que a priori se considera que determinan su consumo energético.

El uso de un edificio está referido no sólo al conjunto de actividades que se desarrollan en él, sino también al uso de los recursos energéticos que se consumen para realizar dichas actividades y, lo que es más importante, satisfacer las necesidades de confort de los usuarios. El consumo de energía de una edificación estará relacionado con las diferentes aplicaciones que tenga (alumbrado, climatización, equipamiento, etc.), y el consumo total será la sumatoria de los consumos de cada una de estas aplicaciones.

$$CE_{TOTAL} = \sum Ce1 + Ce2 + \dots + CeN \quad (1)$$

Como planteamiento de partida, se define que para cada aplicación, el consumo debería estar relacionado con la energía que consumen los aparatos disponibles en el edificio en términos de “Potencia instalada”, el rendimiento que tengan dichos aparatos (en términos de energía útil/energía consumida) y el uso que se haga de ellos (en términos de horas de utilización).

Si se considera cada uno de estos factores como una variable a conocer, el consumo energético (teórico) podría comportarse de acuerdo a la solución de la siguiente ecuación en la que habría que definir la forma de interactuar y relacionarse de las diferentes variables:

$$CE = P * \eta * U \quad (2)$$

Donde:

CE = Consumo de energía

P = Potencia instalada

η = Rendimiento

U = Uso

* = Operadores a definir

2. LA HIPÓTESIS

Para algunas aplicaciones (electrodomésticos, equipos de oficina, por ejemplo), las variables de la ecuación planteada (1) corresponderán a valores fijos relativamente fáciles de identificar, ya que no están asociados a factores “externos” que puedan modificarlas. Así, la potencia instalada será la potencia de los motores eléctricos de los aparatos, el rendimiento será el rendimiento nominal –supondremos que estadísticamente real– de las máquinas, y el uso será la cantidad de horas de utilización de los mismos.

En otras aplicaciones como la iluminación artificial o la climatización, las variables de esta ecuación planteada pueden tener una gran variación en función de algunos factores adicionales que influyen en la definición de cada una de ellas.

En el caso de la climatización, encontramos que la potencia instalada obedece a unas necesidades energéticas de acuerdo con el tipo de edificio, las características arquitectónicas y constructivas, el clima del lugar en que se encuentre ubicado, las condiciones del emplazamiento y el perfil teórico de uso y gestión previsto². Desde este punto de vista, más que de potencia instalada vale la pena hablar de demanda energética (D).

El rendimiento deberá estar asociado no sólo a las máquinas que produzcan el frío o el calor en el edificio, sino al rendimiento medio (η) de todos los elementos que puedan asociarse al sistema de calefacción o al sistema de refrigeración, en función de sus características técnicas y al perfil teórico de uso y gestión que se prevea³.

En cuanto al uso, se observa que tanto en la estimación de la demanda energética, como en el rendimiento medio de los sistemas, se ha considerado un perfil teórico óptimo de utilización, relacionado de un lado con el uso de los espacios y de otro con la administración de los sistemas y recursos que se consumen en el edificio. Este perfil es teórico, porque responde a unas determinadas condiciones de funcionamiento prevista. En el caso del proyecto de nuevas edificaciones bastará con que estas condiciones se ajusten a la realidad del uso y la gestión del edificio para calcular el consumo de energía previsto.

Para edificios existentes, es necesario evaluar si el edificio funciona de acuerdo con las condiciones teóricas previstas, o si por el contrario, la realidad de funcionamiento del edificio difiere de lo previsto y existe un *factor de gestión* (G_e) que tendrá la misión de “ajustar” la variación de las condiciones teóricas previstas respecto a la realidad de uso y funcionamiento del edificio.

Considerando lo expuesto, la ecuación inicialmente planteada para los usos energéticos, podría suponer un cambio en algunas de sus variables de la siguiente manera:

$$CE = D * \eta * G_e \quad (3)$$

Donde:

CE = Consumo de energía

D = Demanda energética

η = Rendimiento medio de las instalaciones

G_e = Factor de gestión

* = Operadores a definir

La mayoría de las investigaciones relacionadas con el consumo de energía en los edificios y los factores que lo condicionan dan por sentada la incidencia de dos factores fundamentales: la demanda del edificio y el rendimiento de las máquinas. El uso y/o la gestión de los edificios no se considera un factor independiente, sino que forma parte de los elementos que condicionan la demanda.

La ecuación que se plantea (3), pretende identificar la energía que un edificio debería consumir para satisfacer sus necesidades energéticas (demanda), la energía que se “sacrifica” en aras del rendimiento medio (η) de los sistemas, y mediante el factor de gestión (G_e) identificar la incidencia que puede tener la variación de las condiciones de uso y gestión del edificio respecto a lo previsto teóricamente.

Es importante considerar que, de todas las aplicaciones energéticas de un edificio, aquéllas que están directamente relacionadas con el confort de los usuarios son la iluminación artificial y especialmente la climatización, que tiene la mayor incidencia en el consumo final de energía (entre el 40-60% en función de la tipología

de uso), lo que supone también la mayor incidencia del uso, de la arquitectura y del arquitecto como proyectista.

A partir de este planteamiento, este trabajo se interesa por el análisis del consumo de energía para la climatización de los edificios, considerando los diferentes factores que determinan la ecuación planteada, así como la forma de interactuar y relacionarse entre ellos, planteamiento que se pretende desarrollar mediante el análisis de edificios existentes.

Aunque en términos generales se puede estar de acuerdo con este planteamiento como base de análisis, se considera importante constatar que, en la realidad de consumo de energía en los edificios se observa que hay una gran dispersión de los resultados respecto a las estimaciones (en muchos casos bastante significativa), que puede estar determinada en gran medida por la dispersión en los valores previstos de factores que pueden llegar a tener una gran variabilidad, como pueden ser el uso y la gestión de los edificios.

3. METODOLOGÍA

El análisis de la hipótesis planteada se desarrolló mediante el estudio de las características y el seguimiento del consumo energético, durante el período de un año, de algunos edificios, con diferencias y similitudes en cuanto a los factores que a priori se considera que determinan su consumo energético: la ubicación (el clima), las características del edificio (arquitectónicas, constructivas) y el tipo de uso y gestión que tienen.

Considerando que un Campus universitario permite disponer de diversas edificaciones con las características y condiciones requeridas, con una disponibilidad de acceso a la información más o menos centralizada y con la posibilidad de realizar una buena coordinación logística del trabajo de campo a realizar, se seleccionaron seis edificios de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona y poblaciones cercanas como muestra a estudiar.

Los edificios seleccionados se han dividido en dos grupos de acuerdo a sus características y tipología de uso: Edificios en Campus y Edificios Autónomos (que poseen todos los usos que le permiten funcionar con autonomía). Esta división y las tipologías de uso se resumen en la (Tabla 1).

| CATEGORÍA | TIPOLOGÍA | USOS | UBICACIÓN |
|---------------------|---|---|-----------------------|
| Edificios autónomos | Escuela Politécnica Superior de la Edificación de Barcelona (EPSEB) | Mixtos: Despachos, aulas, laboratorios, biblioteca, bar, etc. | Barcelona |
| | Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB) | Mixtos: Despachos, aulas, laboratorios, biblioteca, bar, etc. | Barcelona |
| | Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès (ETSAV) | Mixtos: Despachos, aulas, laboratorios, biblioteca, bar, etc. | Sant Cugat del Vallès |
| Edificios en Campus | Módulo C-3 | Mixtos: Despachos, aulas, laboratorios | Barcelona Campus Nord |
| | Módulo D-4 | Mixtos: Despachos, aulas, laboratorios | Barcelona Campus Nord |
| | Módulo A-6 | Especializado: Aulario | Barcelona Campus Nord |

Tabla 1. Edificios seleccionados para el estudio: características principales

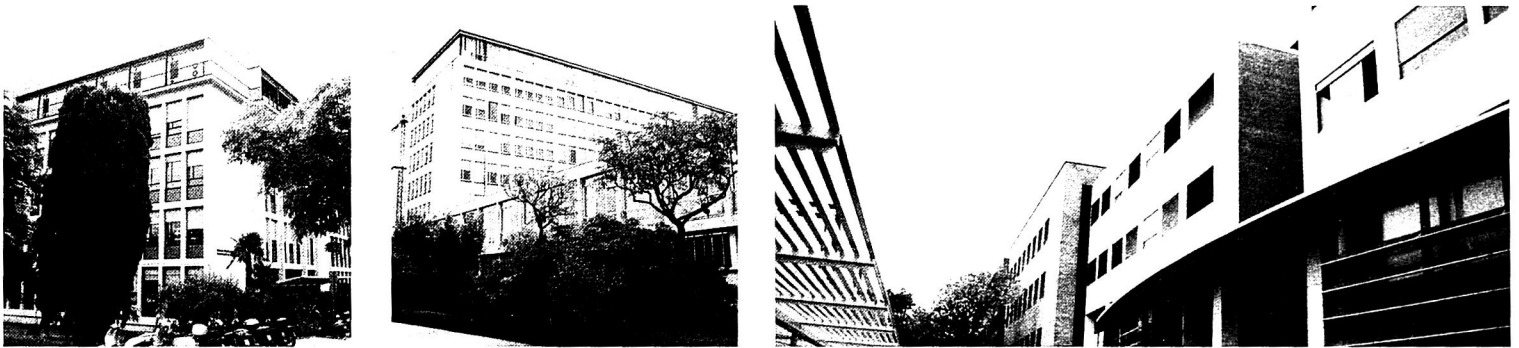


Fig. 1. Aspecto general de algunos de los edificios seleccionados como objeto de estudio

La evaluación de los edificios se desarrolló de acuerdo con la metodología de “auditoría energética”⁴ recogiendo la información relacionada con las características arquitectónicas y constructivas de los edificios, las características del uso que poseen y los datos históricos de consumo de energía, a manera de inventario.

De otro lado, se llevó a cabo la monitorización del consumo de energía de los edificios que se realizó de forma detallada en períodos de una “semana tipo” para cada mes del año, utilizando instrumentos de medición que permitieron obtener datos de consumo cada 30 minutos, las 24 horas del día. Durante esta misma “semana tipo” se realizó un seguimiento detallado del uso del edificio, monitorizando la ocupación de los diferentes espacios mediante conteo de personas, que se realizó con visitas aleatorias a los edificios en diferentes horas del día durante esta semana. Al mismo tiempo se registraron los datos climáticos de cada período del año también en períodos de 30 minutos. Los datos obtenidos permitieron obtener perfiles tipo de uso y consumo de energía de cada edificio para los diferentes meses del año.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de las variables

La primera variable analizada son las necesidades energéticas de la calefacción y de refrigeración (demanda de calefacción y refrigeración). Existen diversos tipos de metodologías y herramientas para realizar este análisis que permiten obtener diferentes resultados, según la consideración que hagan de los diferentes factores que condicionan la demanda energética de un edificio como pueden ser el tipo de análisis que realicen (unizona o multizona) o con el régimen de transferencia de calor que consideren (estacio-

nario o transitorio), por ejemplo⁵. Las siguientes herramientas se han seleccionado para evaluar la demanda energética de los edificios (Tabla 2).

El Método de los Grados Día, una metodología muy sencilla que realiza el cálculo de la demanda energética anual a partir de la definición detallada de la envolvente del edificio, los aportes internos y considerando la variación de las condiciones exteriores, que se traducen en coeficientes que informan del comportamiento energético del edificio. En base a los coeficientes obtenidos se calcula la demanda energética para calefacción y refrigeración necesaria para alcanzar las condiciones interiores de confort.

El programa ARCHISUN⁶ es una herramienta del tipo monozona, que realiza los cálculos del balance térmico del edificio en régimen semi-transitorio y permite obtener valores de demanda anual de calefacción y refrigeración.

La herramienta BALANÇ⁷, realiza un análisis considerando que el incremento de temperatura interior de un edificio depende fundamentalmente del balance energético durante un determinado periodo (una hora por ejemplo) y la capacidad de acumulación de los diferentes elementos de la envolvente. La herramienta calcula la variación interior de la temperatura y define para un periodo de 24 horas la energía total necesaria (en frío o en calor) para mantener el balance energético en 0, considerando que la temperatura interior varíe dentro de la banda de confort correspondiente para cada periodo del año, y el edificio termine el periodo con la misma temperatura inicial.

Finalmente, el programa informático LIDER⁸ (versión 0.99 de 2005) realiza una simulación de la demanda energética hora a hora, en régimen transitorio de transferencia de calor, considerando todas las zonas que tiene el edificio (análisis multi-zona). Este software es la herramienta oficial de España para el cumplimiento de

| RESUMEN CARACTERÍSTICAS | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Herramienta | Generales | | | Parámetros del análisis | | | | | | Resultados | | | |
| | Tipo de análisis | Periodo análisis | Entrada gráfica | Régimen de transferencia de calor | Temperaturas de confort | Perfil de uso | Condic clima exterior | Inercia térmica | Puentes térmicos | Tª interior | Aporte energético | Demanda por componentes | Unidades |
| Método grados día | Mono zona | Invierno/verano | No | Estacionario | Fija-grados-día | Índices | Grados día | Estimación global-índice | No, cálculo manual | No se visualiza | No se visualiza | No se visualiza | Wh por periodo |
| ARCHISUN | Mono zona | Invierno/verano | No | Estacionario variable | Fijas no modificables | Modificable global | Variable por estación | Tª del cerramiento | No, cálculo manual | Sí, por estaciones | No se visualiza | No se visualiza | Wh/m² por periodo |
| BALANÇ | Mono zona | Hora a hora | No | Estacionario variable | Banda de confort variable | Variable hora a hora | Variable hora a hora | Hora a hora | No, cálculo manual | Sí, hora a hora | Sí, hora a hora | No se visualiza | Wh/día |
| LIDER | Multi zona | Hora a hora | Sí | Transitorio | Fijas no modificables | Fijo no modificable | Base de datos no modificable | Acumulación reg transito | Sí, automáticos | No se visualiza | No se visualiza | Sí, en cada local/zona | Kwh/m² |

Tabla 2. Herramientas de análisis de la demanda y sus características

las exigencias normativas de demanda energética de los edificios. Los resultados obtenidos para cada grupo de edificios analizados se representan en este artículo (Figs. 2 y 3).

Aunque el análisis se realiza sobre edificaciones existentes que requerirían, probablemente, de una adaptación de estas metodologías de cálculo para reflejar todas las singularidades de la realidad constructiva de los edificios, el análisis de los resultados permite identificar que en general hay una correspondencia entre los resultados obtenidos con las diferentes herramientas, sin embargo se aprecia que la metodología multizona que calcula la transferencia de calor en régimen transitorio es mucho más detallada y precisa en su análisis y permitiría una simulación mas aproximada de las singularidades de los edificios. Esta característica es muy significativa, especialmente en caso de edificios de geometría compleja respecto a los edificios de geometría simplificada (edificios en campus en nuestro caso), en los que los resultados obtenidos no presentan diferencias grandes.

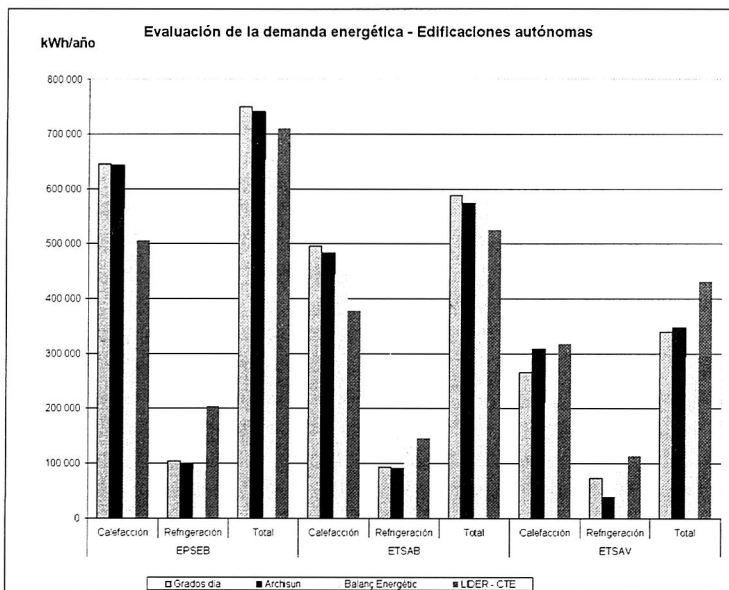


Fig. 2. Resultados de cálculo de la demanda energética. Edificios autónomos

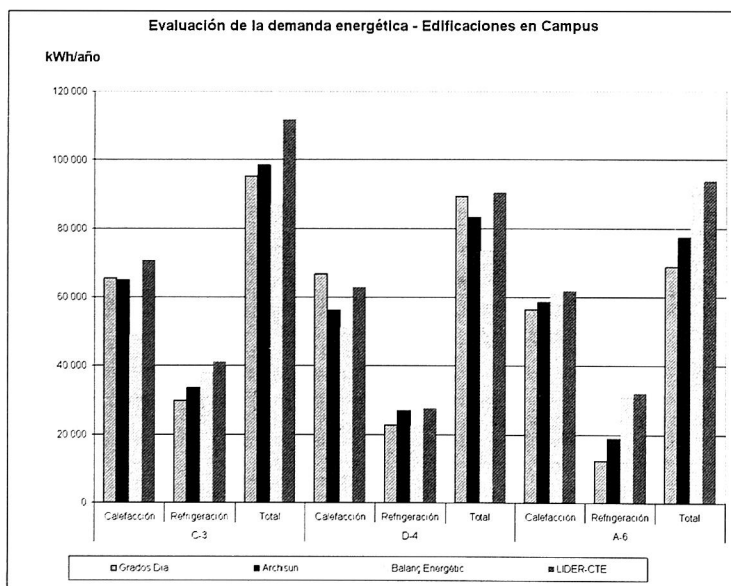


Fig. 3. Resultados del cálculo de la demanda energética: Edificios en Campus

4.2 Rendimiento de los sistemas

Tomando como premisa que la energía para generar el clima de interior del edificio tiene diversas fases desde su origen hasta su utilización final, para evaluar el funcionamiento de los sistemas, no sólo de los elementos que lo componen por separado, es necesario evaluar el funcionamiento de cada fase. De acuerdo a las características de los sistemas de climatización empleados en cada edificio se plantea entonces la resolución de la siguiente ecuación:

$$\eta: \eta_g \times \eta_d \times \eta_c \quad (4)$$

Donde:

- η : Rendimiento global
- η_g : Rendimiento de generación
- η_d : Rendimiento de distribución
- η_c : Rendimiento de control y regulación

Para conocer el rendimiento global del sistema (sistema de calefacción o de refrigeración) es necesario conocer sus características, la gestión y el nivel de mantenimiento que tiene¹⁰. Con la información levantada de los edificios fue posible realizar esta evaluación, calificando entre 0-100% las condiciones de cada fase. Pero también es posible utilizar software especializado para evaluar el rendimiento de los sistemas de acuerdo a su consumo energético, a la gestión y mantenimiento y considerando todas las características de los elementos que componen cada sistema. Para realizar esta simulación se ha utilizado el programa CALENER GT⁸ (versión 2.0 de 2005) que es una adaptación a la normativa local del programa DOE.2⁹. Los resultados obtenidos a partir de la estimación con valores de referencia y con CALENER GT para cada uno de los edificios son:

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa un bajo rendimiento en los sistemas de calefacción (centralizados) probablemente como resultado del propio diseño del sistema (zonificación) y de un nivel mínimo del control y regulación (edificios autónomos).

En el caso de los sistemas de refrigeración estudiados, éstos tienen un rendimiento más elevado, ya que en todos los edificios estudiados son equipos individuales que reducen sus pérdidas por distribución y regulación.

4.3 Análisis de la gestión de los edificios

Para analizar la incidencia de la gestión es necesario distinguir, en primer lugar, entre la gestión del consumo de recursos

| EDIFICIO | Valores de referencia $\eta: \eta_g \times \eta_d \times \eta_c$ | | CALENER | |
|--------------|---|---------------|-------------|---------------|
| | Calefacción | Refrigeración | Calefacción | Refrigeración |
| ETSEB | 0,73 | 2,1 | 0,715 | 2,0 |
| ETSAB | 0,60 | 2,0 | 0,647 | 2,0 |
| ETSAV | 0,67 | 2,3 | 0,600 | 2,0 |
| EDIFICIO C-3 | 0,75 | 1,71 | 0,748 | 1,23 |
| EDIFICIO D-4 | 0,73 | 2,2 | 0,688 | 2,0 |
| EDIFICIO A-6 | 0,70 | - | 0,723 | |

Tabla 3. Resultados obtenidos para el análisis del rendimiento medio de sistemas.

energéticos y la gestión del uso de los espacios del edificio (ocupación). Con el seguimiento del uso de los edificios que se realizó en la fase de auditoría energética, se pudo conocer cuáles eran los “perfiles de ocupación” en diferentes períodos del año en cada edificio. Esta información ha sido fundamental para el análisis de la demanda energética, y para evaluar las condiciones de confort en que funciona cada edificio. En el caso de la gestión de los recursos, el interés es conocer si la energía que se consume en el edificio realmente atiende las necesidades de los usuarios (demanda), o si está suministrando energía (frío o calor) en los momentos o en las cantidades que no son necesarias, y que se traduciría en una ineficiencia del sistema⁹. Para conocer y valorar la ineficiencia es necesario saber cuál es el comportamiento de los parámetros de confort interior cuando se aporta la energía que el edificio consume.

Para realizar este análisis es necesario hacer el balance energético del edificio para un período específico (un día, por ejemplo, en fracciones de 1 hora), que incluye los valores de ocupación de los espacios según la monitorización del uso (número de personas por hora), la calefacción y la refrigeración consumida realmente (según la monitorización del consumo), y la variación de la temperatura interior del edificio en el mismo período.

Respecto a los parámetros de confort, es demasiado rígido pensar en valores fijos de referencia para la temperatura y la humedad, por eso se plantea realizar el análisis referido a una banda de confort óptima para cada período del año.

De acuerdo con el comportamiento de la temperatura interior del edificio en relación a esta banda de confort óptima para cada período del año, se podrá establecer si la energía aportada es adecuada, o si el edificio se desequilibra térmicamente en este período.

Cuando la temperatura interior del edificio no se mantenga dentro de los parámetros de confort definidos con el aporte de la energía que consume, se evalúa si es posible mantenerlo dentro con menos consumo energético, y la relación entre la energía que debe consumir teóricamente (C_t) respecto a que realmente consume (C_r) permitiría para establecer el grado de la ineficiencia en la gestión. (Fig. 4.).

En términos matemáticos esto se traduce en la relación entre las superficies de las gráficas representadas, o lo que es lo mismo, de las integrales de las dos funciones representadas $\int C_t / \int C_r$ para un período de 24 horas, lo que nos permitiría obtener un valor adimensional entre 0 y 1, que indica el grado de eficiencia de la gestión de los recursos a partir de las condiciones reales de funcionamiento del edificio y que se convertiría en el factor de gestión (G_e) a considerar en la ecuación:

$$G_e = \frac{\int_0^{24} C_t}{\int_0^{24} C_r} \quad (5)$$

Obteniendo un valor de $G_e = 0,80$ supondría que el 20% de la energía usada para la calefacción o refrigeración son innecesarios y supondría la prueba de una gestión deficiente y por lo tanto, optimizable.

Para realizar este análisis se debe poder utilizar cualquier herramienta de evaluación de la demanda energética que permita estimar las variaciones de los parámetros de confort (hora a la hora) con relación a una banda de confort variable, durante un “día tipo” y mediante el análisis de diferentes “día tipo” a lo largo del año, extrapolar este comportamiento para cada período (calefacción o refrigeración), y al total del año.

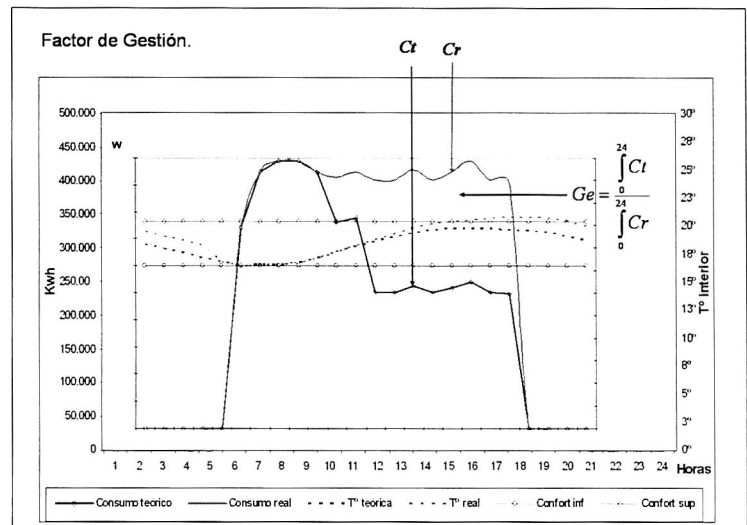


Fig. 4. Análisis de la eficiencia en uso de la energía en un edificio para un día tipo en el período de calefacción

Para los edificios estudiados, el análisis del período del verano (refrigeración) refleja (excepto en el caso del edificio C-3 que posee el sistema de refrigeración centralizado) que los edificios tienen sistemas de refrigeración individual para satisfacer las necesidades de una parte mínima de los espacios de cada edificio (según políticas de la Universidad) que producen resultados negativos del coeficiente G_e , que no se consideran en el análisis global de la gestión, ya que supondría que tiene que consumir más recursos de los que actualmente puede consumir con los sistemas que poseen. En el período de invierno (calefacción), los resultados obtenidos para cada edificio son los que se muestran en la Tabla 4.

4.4 Análisis de la ecuación planteada

Para cada edificio se han obtenido valores de cada una de las variables de la ecuación propuesta (4); el paso siguiente fue definir la forma de operar de estas variables.

Inicialmente, la resolución de la ecuación permitiría conocer el consumo teórico de energía para climatización en este caso expresado en kWh al año. La primera variable estudiada con diferentes herramientas de análisis es la demanda teórica anual de energía. Si consideramos que los valores de demanda obtenidos varían para cada edificio analizado según las características y calidad de los resultados de cada herramienta de evaluación empleada, se ha estimado un valor medio de demanda obtenida para cada edificio con las diversas herramientas utilizadas, despreciando los valores

| EDIFICIO | VALORES G_e PERIODO DE INVIERNO | | | | |
|----------|-----------------------------------|---------|-----------|-----------|----------|
| | Enero | Febrero | Noviembre | Diciembre | Promedio |
| ETSEB | 0,72 | 0,69 | 0,72 | 0,89 | 0,75 |
| ETSAB | 0,71 | 0,90 | 0,76 | 0,69 | 0,77 |
| ETSAV | 0,44 | 0,43 | 0,45 | 0,42 | 0,44 |
| C-3 | 0,79 | 0,72 | 0,75 | 0,88 | 0,78 |
| D-4 | 0,91 | 0,80 | 0,65 | 0,72 | 0,77 |
| A-6 | 0,94 | 0,94 | 0,93 | 0,80 | 0,90 |
| EDIFICIO | VALORES G_e PERIODO DE VERANO | | | | |
| | Junio | Julio | Promedio | | |
| C-3 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | | |

Tabla 4. Resultados análisis del factor G_e asociado a la gestión de los recursos energéticos en los edificios

| Resumen demanda energética anual | | | |
|----------------------------------|-------------|---------------|---------------|
| Edificio | Calefacción | Refrigeración | Demanda Total |
| EPSEB | 535.271 kWh | 145.449 kWh | 680.719 kWh |
| ETSAB | 410.745 kWh | 138.493 kWh | 549.238 kWh |
| ETSAV | 263.637 kWh | 99.242 kWh | 362.879 kWh |
| Edificio C-3 | 61.575 kWh | 37.600 kWh | 99.175 kWh |
| Edificio D-4 | 56.727 kWh | 25.714 kWh | 82.441 kWh |
| Edificio A-6 | 61.456 kWh | 31.556 kWh | 93.012 kWh |

Tabla 5. Demanda de calefacción y refrigeración (D), obtenida a partir del análisis de los valores obtenidos con cada herramienta (gráfico 2).

extremos (superiores o inferiores) para tener un valor de referencia adecuado (Tabla 5).

Para el rendimiento de los sistemas se consideran los valores obtenidos con el software CALENER GT por sus características y la fiabilidad de los datos obtenidos (Tabla 3). Estos valores actuarán como denominadores con respecto a la demanda obtenida.

Por lo tanto, para obtener el consumo energético teórico (CE) la ecuación planteada se resolverá de la siguiente manera:

$$CE = D/\eta \cdot G_e \quad (6)$$

El consumo teórico de energía obtenido refleja el consumo que cada edificio debe tener de acuerdo con sus características constructivas, la calidad de sus sistemas y con la gestión observada. En la Tabla 6, si se comparan los valores obtenidos para este consumo teórico con los datos reales de facturación de los edificios estudiados, es posible establecer un primer análisis del desempeño energético de los edificios. La diferencia entre estos valores indicaría la cantidad de energía desaprovechada en el consumo real respecto a las verdaderas necesidades de cada edificio.

Pero, de la misma forma que es posible obtener un consumo teórico si ya conocemos el valor real de consumo facturado, el rendimiento de los sistemas y la gestión (por la auditoría realizada en los edificios), la ecuación propuesta podría ayudarnos a conocer el valor de la demanda realmente atendida en cada edificio (Demanda ajustada = D_a), o lo que es lo mismo, la cantidad de energía que realmente se entrega en el edificio. La ecuación inicialmente propuesta se transformaría de la siguiente manera:

$$D_a = EC \times \eta \times G_e \quad (7)$$

La comparación de la demanda obtenida al resolver esta ecuación (7) con los valores de la demanda teórica obtenidos con las herramientas de la evaluación (Tabla 7) permitiría establecer el porcentaje de las necesidades energéticas que se atienden con la energía entregada y, en consecuencia, la eficiencia en el consumo de energía de los edificios estudiados.

Además, conocer la cantidad de energía realmente aportada en los edificios también permite realizar una valoración del peso de cada variable planteada en el consumo final de energía (Fig. 5).

Los resultados observados reflejan la forma en que se utiliza la energía que los edificios consumen, si se considera que en promedio los sistemas pueden “sacrificar” una cuarta parte de la energía en su rendimiento, observamos que en la mayoría de los edificios sólo entre el 50 y el 60% de la energía atiende la demanda energética (el confort de los usuarios) y que la ineficiencia en la gestión puede suponer valores entre el 34% y el 10% de la energía que se consume en promedio.

El edificio de la ETSAV tiene unos índices muy diferentes al resto de edificios estudiados, ya que menos del 30% de la energía que consume satisface la demanda del edificio y sacrifica una tercera parte de lo que consume por la ineficiencia de sus sistemas, y mas del 34% en la ineficiencia en su gestión.

| Edificio | Uso energético | D | η | G_e | Consumo energético CE |
|----------|----------------|-------------|--------|-------|-----------------------|
| EPSEB | Calefacción | 535.271 KWh | 0,75 | 0,75 | 992.704 KWh |
| | Refrigeración | 145.449 KWh | 2,00 | 1,00 | 72.724 KWh |
| | Total | 680.719 KWh | | | 1.065.428 KWh |
| ETSAB | Calefacción | 410.745 KWh | 0,65 | 0,77 | 822.658 KWh |
| | Refrigeración | 138.493 KWh | 2,00 | 1,00 | 69.246 KWh |
| | Total | 549.233 KWh | | | 891.905 KWh |
| ETSAV | Calefacción | 263.637 KWh | 0,60 | 0,44 | 997.130 KWh |
| | Refrigeración | 99.242 KWh | 2,00 | 1,00 | 49.621 KWh |
| | Total | 362.879 KWh | | | 1.046.751 KWh |
| C-3 | Calefacción | 61.575 KWh | 0,75 | 0,78 | 105.026 KWh |
| | Refrigeración | 37.600 KWh | 1,30 | 0,94 | 30.802 KWh |
| | Total | 99.175 KWh | | | 135.828 KWh |
| D-4 | Calefacción | 56.727 KWh | 0,69 | 0,77 | 106.867 KWh |
| | Refrigeración | 25.714 KWh | 2,00 | 1,00 | 12.857 KWh |
| | Total | 82.441 KWh | | | 119.724 KWh |
| A-6 | Calefacción | 61.456 KWh | 0,72 | 0,90 | 94.460 KWh |
| | Refrigeración | 31.556 KWh | 1,00 | 1,00 | 31.556 KWh |
| | Total | 93.012 KWh | 0,72 | | 126.015 KWh |

Tabla 6. Consumo energético teórico para calefacción y refrigeración

| Edificio | Uso energético | Demanda Teórica (kWh/año) | Demanda Real D_a (kWh/año) | Diferencia % |
|------------|----------------|---------------------------|------------------------------|--------------|
| EPSEB | Calefacción | 535.271 kWh | 405.086 kWh | 75,68 |
| | Refrigeración | 145.449 kWh | 75.728 kWh | 52,07 |
| | Total | 680.719 kWh | 480.814 kWh | 70,63 |
| ETSAB | Calefacción | 410.745 kWh | 312.761 kWh | 76,14 |
| | Refrigeración | 138.493 kWh | 54.670 kWh | 39,48 |
| | Total | 549.238 kWh | 367.431 kWh | 66,90 |
| ETSAV | Calefacción | 263.637 kWh | 270.860 kWh | 102,74 |
| | Refrigeración | 99.242 kWh | 17.317 kWh | 17,45 |
| | Total | 362.879 kWh | 288.177 kWh | 79,41 |
| Módulo C-3 | Calefacción | 61.575 kWh | 56.805 kWh | 92,25 |
| | Refrigeración | 37.600 kWh | 29.114 kWh | 77,43 |
| | Total | 99.175 kWh | 85.919 kWh | 86,63 |
| Módulo D-4 | Calefacción | 56.727 kWh | 65.461 kWh | 115,40 |
| | Refrigeración | 25.714 kWh | 16.377 kWh | 63,69 |
| | Total | 82.441 kWh | 81.838 kWh | 99,27 |
| Módulo A-6 | Calefacción | 61.456 kWh | 70.568 kWh | 114,83 |
| | Refrigeración | 31.556 kWh | 0 kWh | 0,00 |
| | Total | 93.012 kWh | 70.568 kWh | 75,87 |

Tabla 7. Demanda energética teórica y energía realmente entregada en el edificio (Demanda real D_a)

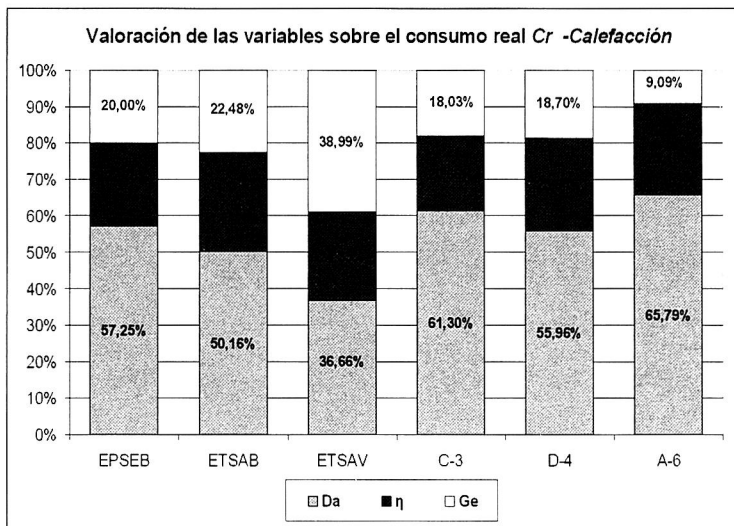


Fig. 5. Incidencia (%) de cada variable respecto al total de consumo energético para calefacción

5. RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES DE LA TESIS

El desarrollo del trabajo y la resolución de la ecuación propuesta permiten establecer que, de los factores que pueden incidir en el consumo final de energía, la gestión de los edificios (asociada al uso de los espacios y a la gestión de los sistemas energéticos) tiene la mayor incidencia en el consumo final de energía porque es un factor común a todas las variables que determinan el consumo, y es determinante, porque condiciona la variación de los valores teóricos de cada variable respecto al consumo energético total.

A partir de lo anterior, la principal conclusión de este trabajo es que el consumo de energía en edificios de la tipología de los estudiados es función principalmente de la gestión como factor determinante.

La valoración de la variable de gestión (G_e) de un edificio, permite identificar la energía realmente entregada en un edificio para un uso específico (climatización), y valorar la eficiencia en el uso de los recursos energéticos, para promover acciones de mejora del rendimiento energético y reducción del impacto ambiental asociado a este consumo.

Se evidencia la necesidad de definir una estrategia energética para cada edificio. La definición de esta estrategia debe partir necesariamente de la definición del perfil de uso y gestión del edificio, por ser el factor principal¹¹.

La mayoría de trabajos relacionados con el consumo de energía en edificios reconocen que la gestión tiene un papel muy importante en el consumo final de energía, pero son pocos los trabajos que se han dedicado a parametrizar y evaluar dicha incidencia a partir del análisis de edificios existentes. Esta aproximación y la definición de una metodología que permita realizar este análisis se considera un aporte importante de este trabajo.

El planteamiento de partida de la investigación desde la perspectiva de un arquitecto parte de la consideración de que el confort y la habitabilidad de los edificios es fundamentalmente una cuestión de arquitectura. En este sentido, el arquitecto es fundamentalmente un gestor de recursos que deberá plantearse como objetivo principal de cualquier proyecto que acometa la eficiencia en el uso y la gestión de los recursos que toma del medio natural y que habitualmente transforma en residuos.

6. TRABAJOS POSTERIORES A LA TESIS

Como se ha visto, parte de las conclusiones de la Tesis doctoral subrayan el bajo rendimiento de los sistemas y la ineficiencia en la gestión de los sistemas energéticos del edificio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès – ETSAV (paradójicamente, un edificio donde se enseña a construir edificios), que suponían un derroche muy elevado del consumo final de recursos energéticos del edificio (por encima del 30% en cada caso).

A la vista de estos resultados, la dirección de la Escuela ha querido que su edificio sea el banco de pruebas sobre el cual estudiar y concretar una estrategia de actuación extrapolable a la mayor parte del parque de edificios de la UPC¹³. El primer objetivo del trabajo fue revisar el trabajo realizado desde la perspectiva académica en la Tesis, validar las hipótesis, las herramientas de análisis y la metodología y poder identificar los posibilitados de actuación sobre el edificio de la ETSAV –el edificio, las instalaciones y su perfil de uso y gestión–, para reducir las emisiones de CO_2 asociadas al consumo de recursos energéticos. A partir de los resultados de este análisis, se pretendía incorporar actuaciones de fácil implementación y mínimo coste con los que obtener resultados significativos en términos de ahorro energético y reducción de emisiones.

6.1 Metodología

El consumo de energía en la ETSAV, tiene como principal protagonista el consumo asociado a la climatización del edificio (fundamentalmente a la calefacción) que supone más del 61% del total de la energía consumida.

Tomando como referencia el potencial de optimización que tendría el edificio que se proponía en la Tesis (más de un 34% de energía a ahorrar mejorando la gestión), la dirección de la Escuela planteó en primer lugar la incorporación inmediata de medidas relacionadas con la optimización de la gestión del sistema de calefacción (el de mayor peso en el consumo) así como de la gestión y el uso del edificio, sin dejar de analizar en forma paralela las posibilidades de reducir la demanda y optimizar el rendimiento de los sistemas. Se realizaron una serie de actuaciones sobre el edificio que se resumen a continuación.

6.2 Obtención de datos sobre las características de los sistemas

Se comenzó por actualizar la información relacionada con las características del sistema de calefacción del edificio. La información recogida sobre las características del sistema y sus componentes permitió valorar, sólo de forma aproximada, cómo funciona el sistema e intuir cómo podría ser su capacidad de respuesta a la hora de gestionarlo.

6.3 Conocer el perfil de gestión de las instalaciones de calefacción

Inicialmente, se identificó que la gestión que se hacía del sistema se limitaba a programación (manual) de encendido y apagado de la totalidad del sistema. Una segunda fuente de información proviene de los datos que se recogen de forma automática a través de seguimiento on-line dentro del sistema SIRENA¹².

Los dispositivos que se incorporaron en el edificio de la ETSAV desde enero de 2006 permiten disponer de registros históricos e instantáneos cada 15 minutos del consumo de electricidad y gas.

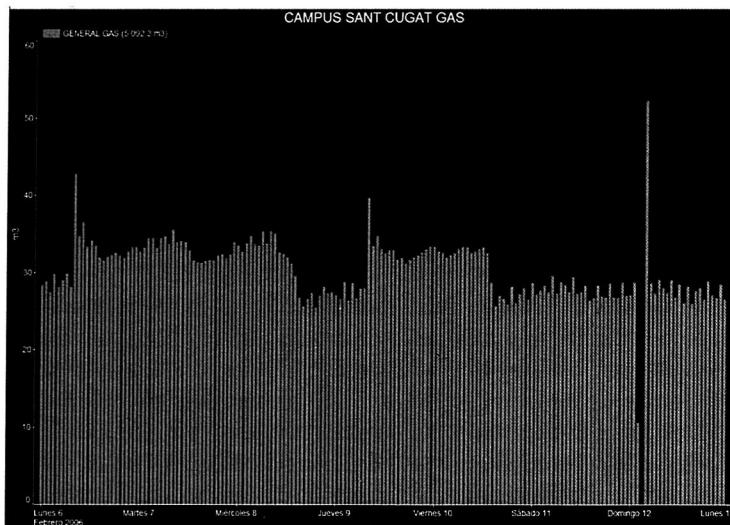


Fig. 6. Perfil de gestión del sistema de calefacción de la ETSAV para una semana tipo del periodo de invierno

Para el periodo que se representa en la figura 6, se puede observar que el sistema de calefacción no se apaga en ningún momento de la semana, el consumo es constante con algunas variaciones (incrementos) de lunes a viernes, y una reducción durante el día jueves que no supone una disminución del consumo que se puede considerar como “base”, que se mantiene en las noches y fines de semana y que es sitúa por encima del 70% del consumo total.

Respecto del patrón de gestión que tiene el edificio, se observa que con los dispositivos que dispone actualmente el sistema (programador general automático) se podría optimizar esta gestión, a pesar de limitarse en una primera fase, a actuar sencillamente a nivel de encendido y apagado de la totalidad del sistema. De otro lado, el sistema tiene unas características (zonificación) que, a pesar de ser limitadas, podría funcionar de una forma más adecuada de acuerdo con las necesidades de los diferentes espacios que cubre.

6.4 Conocer el perfil de ocupación

Para plantear estas actuaciones se considera fundamental tener en cuenta el perfil de ocupación que tiene el edificio, para lo cual se obtuvieron datos de ocupación “teórica” (según los alumnos

matriculados a las diferentes asignaturas y la distribución de aulas prevista, considerando que los profesores ocupan sus despachos al menos cuando atienden a las clases) de los diferentes espacios del edificio, y se dibujó perfil teórico de ocupación del edificio identificando las horas en que la ocupación sería mínima o nula y se podrían programar “paradas” del sistema de calefacción sin afectar al funcionamiento del centro.

6.5 Conocer la evolución del clima

Considerando que el consumo de energía para calefacción debe guardar relación con las variaciones del clima, se ha seleccionado un parámetro, los Grados Día de calefacción, a partir de las temperaturas exteriores horarias durante el periodo de estudio.

Se plantea entonces la posibilidad de intervenir sobre la gestión de los sistemas actuando simplemente sobre la programación de encendido y apagado del sistema, sin intervenir sobre los elementos del sistema con obras o inversiones, es decir a “coste cero”.

6.6 Analizar la capacidad de respuesta del edificio

A la hora de programar encendido y apagado del sistema de calefacción, es muy importante considerar la velocidad de respuesta del sistema para “poner a punto” el edificio, así como su capacidad térmica, es decir la capacidad de la envolvente del edificio de retrasar el efecto de la variación del clima exterior sobre la temperatura interior de los diferentes espacios.

Para valorar este efecto es necesario hacer un análisis detallado de las características de los materiales y de las diferentes soluciones constructivas del edificio. Este análisis se hizo a partir de las gráficas de balance diario obtenidas con la herramienta BALANÇ analizadas en el desarrollo de la tesis (Fig. 7).

Con esta herramienta y utilizando la simulación del balance energético para un día tipo de invierno del edificio de la ETSAV, se estudió, de un lado, lo que sería la evolución “libre” de la temperatura interior a partir de una temperatura inicial de 20°C, sin ninguna aportación de calor, y lo que sería la evolución en el mismo periodo con un aportación de calor como la que se hace habitualmente a lo largo del día, pero con una interrupción nocturna durante algunas horas (0h y las 5h), y otra interrupción durante dos horas a mediodía.

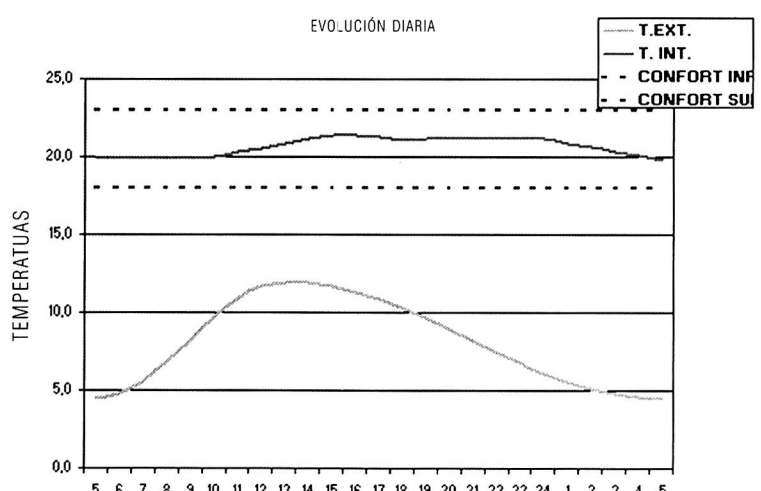
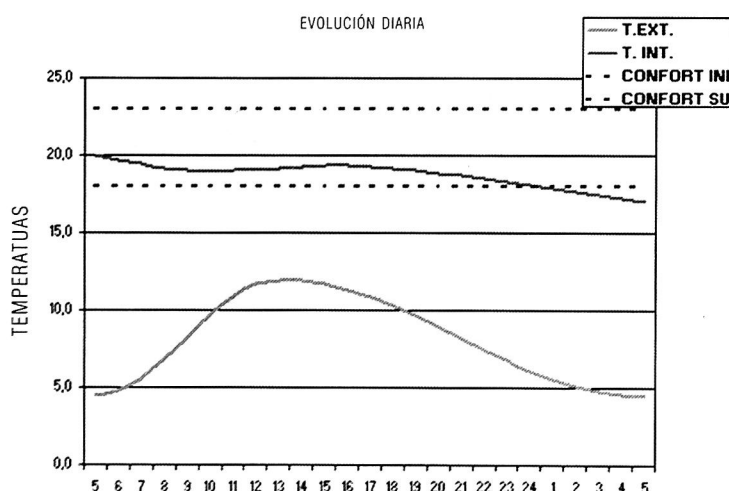


Fig. 7. Análisis de la evolución de la temperatura interior del edificio para un día tipo de invierno, en evolución libre (izq), y con una interrupción del aporte de calor por la noche y en mediodía (dcha)

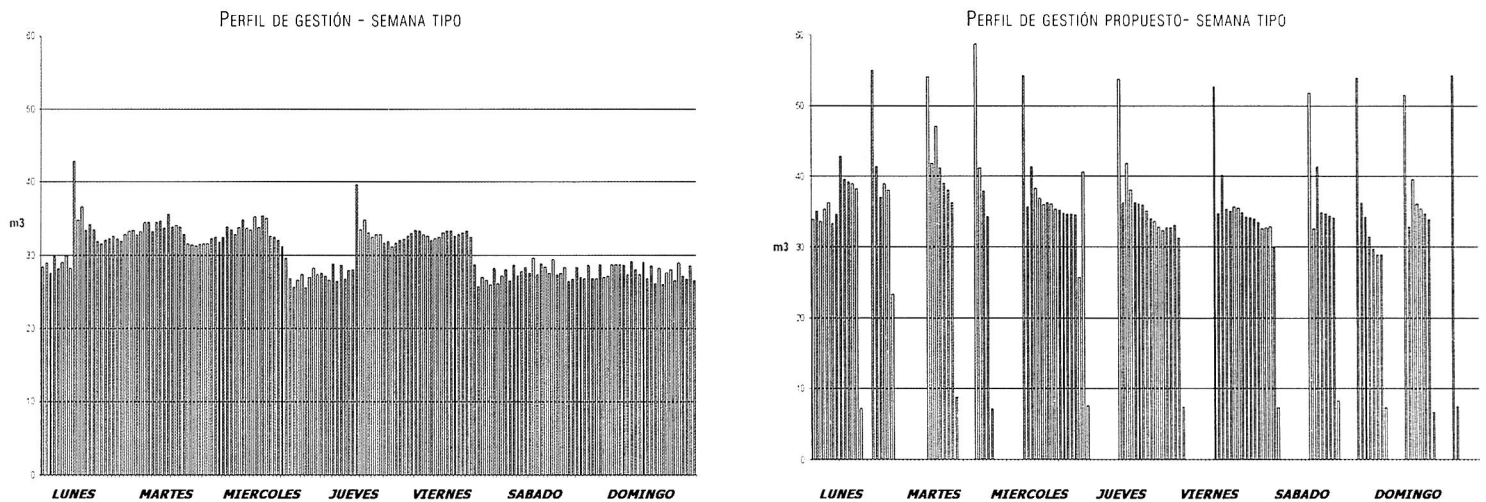


Fig. 8. Intervención sobre el perfil de gestión de la instalación. A la izquierda se observa el perfil tipo existente y a la derecha la propuesta de gestión con pausas nocturnas y escalonamiento

Este análisis sirvió como referencia para definir que un periodo de interrupción nocturna más amplio de las cinco horas nocturnas, o una redistribución del aporte de calor a lo largo del día, deberían estar referidos a un estudio del análisis mucho más detallado de las diferentes zonas del edificio.

6.7 Actuaciones realizadas

En primer lugar se realizaron actuaciones para adaptar la gestión del sistema de calefacción al que sería el funcionamiento real del edificio, identificando las horas en que la ocupación sería mínima o nula y se podrían programar “paradas” del sistema de calefacción sin afectar al funcionamiento del centro, adaptadas a las variaciones de las condiciones exteriores (Fig. 8).

Como era de esperarse, esta gestión del funcionamiento del sistema de calefacción, aun cuando se mantuvieron las condiciones de confort (e incluso se adecuaron más a lo razonable), produjeron un

consumo más reducido y probablemente más adecuado a las necesidades del edificio. También sirvió para identificar la necesidad de establecer un modelo de gestión para los periodos no lectivos dentro de la temporada de calefacción.

Fue necesario definir más de un perfil de gestión, ya que este periodo incluía días de actividad laboral, festivos, etc. Se identificaron los diferentes días tipos, y para cada uno de ellos se definió un perfil de gestión con rutinas de encendido y apagado del sistema de calefacción, de la iluminación, así como espacios a utilizar preferentemente en el edificio.

Además, como los estudiantes necesitan utilizar el edificio en horario no lectivo, por la noche y fines de semana, se seleccionó un aula de trabajo que delimitó mucho el espacio a climatizar fuera de horario lectivo.

Estas actuaciones, aun cuando generaron pequeñas incomodidades a algunos usuarios (problemas de adaptación a un cambio de reglas del juego), contribuyeron en forma significativa al ahorro en

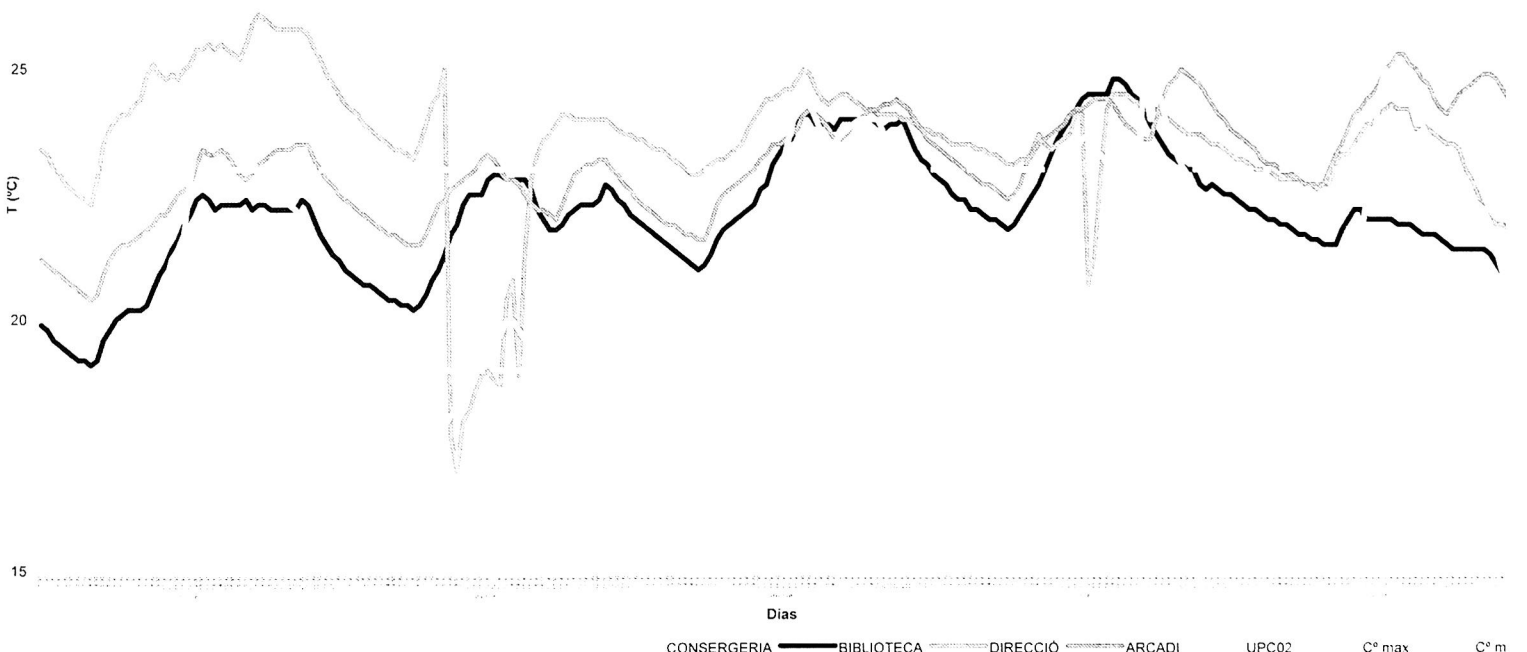


Fig. 9. Control de evolución de temperaturas ETSAV Semana del 7-13 de enero

consumo, fundamentalmente porque permitieron acotar la superficie a calefactar e iluminar en un 70% aproximadamente.

A partir de los resultados obtenidos en las primeras semanas, se ajustaron los perfiles de gestión y ocupación del edificio teniendo en cuenta a las quejas y sugerencias de los usuarios y evaluando el confort interior.

Se implementó una plantilla de seguimiento para llevar de forma sistematizada el registro de las condiciones de funcionamiento del sistema.

Se incorporaron también instrumentos de medida de temperatura superficial para registrar datos de temperatura de impulsión y retorno de los circuitos de calefacción y temperatura superficial de emisores.

También para la medida del confort ambiental se emplearon instrumentos multifunción, que permitieron registrar minuto a minuto las variables de temperatura (°C), humedad (%), presión atmosférica (hPa), niveles de CO₂ del aire (ppm). Esta instrumentación se repartió en diferentes locales que se consideraron representativos del los usos de la Escuela y que recogían gran parte de las quejas de disconfort de los usuarios. (Fig. 9).

Con esta información se ha podido verificar algunas de las consideraciones que de forma “teórica” se habían supuesto hasta ahora, como la respuesta de la temperatura interior a las pausas realizadas del sistema de calefacción, o a la respuesta ante de las oscilaciones diarias de la temperatura exterior, así como la influencia de la ocupación en la oscilación de la temperatura interior.

6.3 Resultados obtenidos con las actuaciones realizadas

La comparación del consumo energético del periodo en que se han realizado las actuaciones respecto del mismo periodo del año anterior demuestran una reducción del 38% del consumo energético. Si este análisis se traslada a las emisiones de CO₂, el ahorro se de 80Tn de CO₂.

Aunque se observa una reducción significativa tanto del consumo como de las emisiones asociadas, hace falta considerar la variación climática, y el aumento de superficie del edificio (por reformas y ampliaciones). Con estas consideraciones el ahorro “corregido” supondría una disminución del 27,6%, en este caso atribuible, exclusivamente, al cambio de gestión de las instalaciones de calefacción del edificio. (Fig. 10).

Además del ahorro energético y la reducción de emisiones obtenida, se ha comprobado (por el seguimiento de quejas y mediciones puntuales) que las condiciones ambientales interiores del edificio no se han visto disminuidas, y permanecen dentro de parámetros adecuados para este tipo de edificios.

| | kWh gas | | tn CO ₂ gas | |
|------------------|-----------|-------|------------------------|-------|
| 2005-2006 | 1.062.424 | 100% | 216,7 | 100% |
| 2006-2007 | 691.381 | 65,1% | 14,1 | 65,1% |

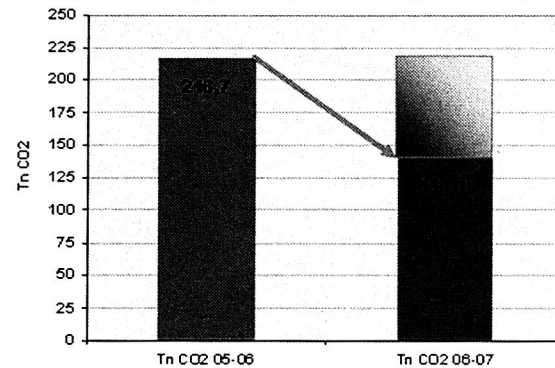


Fig. 10. Resumen de resultados obtenidos

NOTAS

1. LOPEZ, Fabian; Sobre el uso y la gestión como los factores principales que determinan el consumo de energía en la edificación. Tesis doctoral. Barcelona (2006).
2. BAKER, Nick; KOEN, Steemers. Energy and environment in architecture: a technical design guide. London New York : E & FN Spon, cop. (2000).
3. DANIELS, Klaus. Advanced building systems: A technical guide for architects and engineers. Basel: Birkhäuser, cop. (2003).
4. Diputació de Barcelona. Departament de Medi Ambient. Auditories Energètiques II, Instal·lacions i Edificis. Barcelona (1986).
5. HUNN, Bruce D. Fundamentals on building energy dynamics. Cambridge, MA: London: The MIT Press, cop. (1996).
6. SERRA, R. School of Architecture of Barcelona, Technical University of Catalonia (UPC), THERMIE program with the collaboration of Catalan Energy Institut, Politécnico de Milán (Italy), University of Hannover, and Tombazis and Ass., from Greek. ARCHISUN software, 1983.
7. DE BOBES, A. Technology section. E.T.S Architecture Vallès – UPC. Balanç Energètic tool©, 1.999-2003.
8. MOLINA, J.L. ÁLVAREZ, S. VELÁZQUEZ, R. Grupo de Termotecnia. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. CALENER and LIDER software. 2003-2005.
9. DOE2.2. Building Energy Use and Cost Analysis Tool. Lawrence Berkeley National Laboratory and James J. Hirsch & Associates, with major support from the U.S. Department of Energy (program manager Dru Crawley) and the Electric Power Research Institute (program manager Wayne Krill), 1994.
10. McQUOISTON, Faye C.; PARKER, Jerald D.; SPITLER Jeffrey D. (2003). Heating, Ventilating, And Air Conditioning Analysis And Design. México D. F.: Limusa Noriega, cop. (2003).
11. CUCHI, Albert. Arquitectura i Sostenibilitat. Barcelona: Ediciones UPC Temes de Tecnologia y Sostenibilidad (2006).
12. SIRENA. Sistema de Información de recursos energéticos de la UPC HYPERLINK "http://www.upc.edu/sirena" www.upc.edu/sirena.
13. MATA, Erika; RUIZ, Galdric; CUCHÍ, A; LOPEZ, Fabian. Evaluación de la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ de la ETSAV. Informe campaña de invierno 2006-2007.